云 南 植 物 研 究 2010，**32**(1)：60～66
Acta Botanica Yunnanica DOI：10.3724/SP.J.1143.2010.09138

思茅松中幼人工林的生物量碳计量参数*

李 江[1,2]，孟 梦[2]，朱宏涛[3]，邱 琼[2]，
翟明普[1**]，陈宏伟[2]，郭永清[2]
（1 北京林业大学研究生院，北京 100083；2 云南省林业科学院，云南 昆明 650204；
3 中国科学院昆明植物研究所，云南 昆明 650204）

摘要：通过开展思茅松中幼人工林样地调查，基于实测数据计算了相关碳计量参数并研究了碳计量参数与相关林分因子的关系。结果表明：1）思茅松中幼人工林生物量转化与扩展因子（*BCEF*）的平均值为0.5483 $Mg \cdot m^{-3}$（n＝30，95％置信区间：0.5357～0.5609），低于政府间气候变化专门委员会（IPCC）的缺省值。*BCEF* 和平均树高（*H*）、林分形高（*FH*）、蓄积量（*V*）和林龄（*A*）存在显著负相关（$P < 0.05$）。*BCEF* 和平均胸径（*D*）负相关，但相关不显著（$P > 0.05$）。*BCEF* 和 *N*（林分密度）正相关，但相关不显著（$P > 0.05$）。*BCEF* 值与林分因子的关系函数拟合效果不佳。2）思茅松中幼人工林生物量扩展因子（*BEF*）的均值为1.78378（n＝30，95％置信区间：1.71714～1.85043），高于 IPCC 缺省值。*BEF* 和 *D*、*H*、*FH*、*V* 和 *A* 存在极显著的负相关（$P < 0.01$），与 N 存在显著的正相关（$P < 0.05$）。*BEF* 与 *A* 和 *V* 的关系以二次曲线函数形式拟合效果较好，与 N 的关系则以双曲线形式较好，与 *FH*、*H* 和 *D* 的关系以幂函数较好。3）思茅松中幼人工林的根茎比（*R*）均值为0.2400（n＝30，95％置信区间：0.2194～0.2606），与 IPCC 缺省值基本一致。*R* 与 *D*、*H*、*FH*、*V* 和 *A* 有极显著的负相关关系，与 *N* 有显著的正相关关系。*R* 与 *D*、*H*、*FH*、*V* 和 *A* 的关系以二次曲线的形式拟合效果较好，与 *N* 的关系则以双曲线形式拟合较好。

关键词：思茅松人工林；生物量转化与扩展因子；生物量扩展因子；根茎比
中图分类号：Q 948 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-2700(2010)01-060-07

Biomass Carbon Accounting Parameters for Young and Middle Aged Plantation of Simao Pine (*Pinus kesiya* var. *langbianensis*)

LI Jiang[1,2], MENG Meng[2], ZHU Hong-Tao[3], QIU Qiong[2],
ZHAI Ming-Pu[1**], CHEN Hong-Wei[2], GUO Yong-Qing[2]
(1 *Graduate School of Beijing Forestry University*, Beijing 100083, China; 2 *Yunnan Academy of Forestry*, Kunming 650204, China; 3 *Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences*, Kunming 650204, China)

Abstract: Based on data collected from field surveys, biomass carbon accounting parameters including biomass conversion and expansion factor (*BCEF*), biomass expansion factor (*BEF*) and root-shoot ratio (*R*) for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation were calculated, and relationships between the parameters and relative stand factors were studied. Main findings were as follows. (1) Mean *BCEF* for *Pinus kesiya* var.

* 基金项目：云南省应用基础研究 2007C240M；云南省技术创新人材培养项目 2008PY085；云南省科技攻关计划 2004NG05-02；国家林业局 948 项目 2006-4-67；国家科技支撑计划 2008BAD95B09 联合资助
** 通讯作者：Author for correspondence；E-mail：zhmp@bifu.edu.cn
收稿日期：2009-07-21，2009-12-01 接受发表
作者简介：李江（1972－）男，副研究员，在读博士研究生，从事森林培育与林业碳汇研究。

langbianensis plantation was 0.5483 Mg m^{-3} (n=30, 95% confidence interval=0.5357−0.5609), lower than the IPCC default value. *BCEF* for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation was negatively related to stand form height (*FH*), mean stand height (*H*), stand growing stock (*V*) and stand age (*A*) ($P<0.05$). *BCEF* was negatively related to mean diameter at breast height (*D*), but not statistically significant ($P>0.05$), positively related to stand density (*N*), not statistically significant ($P>0.05$). Regression equations developed for calculating *BCEF* with stand factors did not give satisfied estimates. (2) Mean *BEF* for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation was 1.78378 (n=30, 95% confidence interval=1.71714−1.85043), higher than the IPCC default value. *BEF* was negatively related to *D*、*H*、*FH*、*V* and *A* ($P<0.01$), positively related to *N* ($P<0.05$). Regression equations of $y=a+bx+cx^2$ performed well to calculating *BEF* with *A* and *V* as variables. Regression equation of $y=a+b/x$ performed well to calculate *BEF* with *N*. Regression equations of $y=a\ x^b$ performed well to calculate *BEF* with *FH*、*H* and *D* as variables. (3) Mean *R* for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation was 0.2400 (n=30, 95% confidence interval=0.2194−0.2606), close to the IPCC default value. *R* was negatively related to *D*、*H*、*FH*、*V* and *A* ($P<0.01$), positively related to *N* ($P<0.05$). Regression equations of $y=a+bx+cx^2$ performed well to calculate *R* with *D*、*H*、*FH*、*V* and *A* as variables. Regression equation of $y=a+b/x$ performed well to calculate *R* with *N*.

Key words: *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation; Biomass conversion and expansion factor (*BCEF*); Biomass expansion factor (*BEF*); Root to shoot ratio (*R*)

森林是陆地生态系统的主体，森林植被碳贮量约占陆地植被碳贮量的82.5%（Sabine等，2004）。森林在调节全球碳平衡、减缓大气中温室气体浓度上升及维护全球气候系统等方面具有不可替代的作用。生物量是森林固碳能力的重要标志，也是评估森林碳收支的主要指标（Brown等，1996），推算森林生物量成为生态学和全球变化研究的重要内容之一（方精云等，2002）。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）相关规定（IPCC，2003，2006），生物量因子碳计量方法可以用于区域的森林生物量计算，也可用于林分生物量计算，已成为IPCC重点推荐使用的方法之一（罗云建等，2007）。根据IPCC（2006），森林碳计量参数主要包括生物量转化与扩展因子（Biomass conversion and expansion factor，*BCEF*）和生物量扩展因子（Biomass expansion factor，*BEF*）和根茎比（Root to shoot ratio，*R*）等。我国森林碳计量与主要发达国家还有较大差距，迫切需要加强相关的研究，收集和完善相关参数（张小全，2009）。

思茅松（*Pinus kesiya* Royle ex Gord. var. *langbianensis*）是我国亚热带西南部山地的代表种，集中分布于云南南部景谷、思茅、普文等地（徐永椿等，1988；吴中伦等，1999）。对思茅松林生物量开展过的研究较少，仅见吴兆录和堂承林（1992）利用实测标准木生物量法测定了数块思茅松天然林的生物量，对思茅松人工林生物量碳计量参数的研究未见报道。因IPCC提供的默认参数多来自欧洲和北美，默认参数分别按气候带和森林类型提供的，而我国森林有关的数据是按省或地区统计的（张小全，2009），思茅松主要分布于云南，思茅松人工林的碳计量参数与IPCC的缺省值可能会有较大的差异。为了减少利用IPCC的缺省值开展思茅松人工林碳计量的不确定性，本研究于2008年在云南省思茅松集中分布区的4个县市（景洪、思茅、景谷和镇沅）的多个地点调查了林龄为3～26年的30块思茅松人工林样地，实测了36株思茅松样株的生物量，建立了单株生物量回归方程，通过对样地乔木生物量与蓄积量的测算，计算出思茅松人工林的碳计量参数*BCEF*、*BEF*和*R*，初步研究了上述碳计量参数与林龄、平均胸径、林分密度、蓄积量和形高的关系。研究旨在通过获取本地区的生物量碳计量参数降低思茅松人工林生物量碳计量的不确定性。

1 研究方法

1.1 样地调查及样品采集与处理

2008年春季在云南的景谷、思茅、镇沅和普文选取年龄为3～26年的思茅松典型人工林分，设立30 m×30

m 的临时样地 30 块。样地内每木检尺，测量胸径与树高，根据林木平均胸径每样地选取标准木 1～2 株，共取标准木 36 株。标准木全株伐倒，地上部分树干连同枝、叶、果实，采用分层切割法于树干基部、1.3 m、3.6 m，其后每隔 2 m 断开，每段树干称带皮和去皮鲜重并取样。将树冠等分为上、中、下 3 层，每层内以＜1 cm、1～2 cm、2～4 cm、和 ＞4 cm 枝基径分级对枝、针叶和果实分别称重和取样。地下部分根系分 0～30 cm 和 30 cm 以下两层挖掘，按细根（＜1.0 cm）、中根（1.0～2.0 cm）、粗根（＞2 cm）和根桩分类称重并取样。主干样品置烘箱内 60℃温度下烘 2 小时后将温度调至 103±2℃，连续烘 5～8 h 至恒重后称重；松针、树皮、树枝、果实及根样品在 80℃下连续烘 5～8 h 至恒重后称重。根据所测定样品的含水率和鲜重计算各样品干生物量（曾立雄等，2008；刘国华等，2003）。

1.2 样地生物量的测定

根据 36 株标准木的实测生物量资料，建立基于树高和胸径测树因子的思茅松单株地上生物量、树干生物量和全株生物量的异速增长方程如下：

$$B_{全株}=0.04552*(d^2h)^{0.92431}\ (R^2=0.9956) \quad (1)$$

$$B_{地上}=0.02917*(d^2h)^{0.95896}\ (R^2=0.9967) \quad (2)$$

$$B_{主干}=0.00961*(d^2h)^{1.03935}\ (R^2=0.9956) \quad (3)$$

式中：$B_{全株}$为全株生物量（kg）， $B_{地上}$为地上生物量（kg），$B_{主干}$为主干生物量（kg），d 为胸径（cm），h 为树高（m）。

利用公式（1）（2）（3），根据样地实测数据 d 和 h 计算每木地上生物量、全株生物量和主干生物量。为了使计算的地上生物量与地下生物量（根系）的和等于全株生物量，用公式（4）计算地下生物量，将单株生物量分类累计得到相应的样地生物量。

$$B_{地下}=B_{全株}-B_{地上} \quad (4)$$

样地蓄积量的计算

采用云南省森林资源连续清查办公室和云南省林业厅在森林资源调查中使用的形高法（云南省林业厅，2004；云南省森林资源连续清查办公室，2007），计算样地蓄积量。

$$V=G\times FH \quad (5)$$

式中：V 为样地蓄积量（m^3），G 为样地胸高断面积（m^2），FH 为形高值（m）

G 的计算公式如下：

$$G=\sum_{i=1}^{n}\pi\left(\frac{di}{2}\right)^2/40000 \quad (6)$$

式中：n 为样地林木数，di 为样木胸径（cm）

形高 FH 的计算公式为：

$$FH=a\times H^b\div D^c \quad (7)$$

式中：H 为样地平均树高（m）；D 为样地平均胸径（cm）；形高参数 a＝0.65670785，b＝0.92035096，c＝0.014782

样地平均胸径 D 计算公式为：

$$D=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}di^2}{n}} \quad (8)$$

样地平均树高 H 的计算公式：

$$H=\frac{\sum_{i=1}^{5}hi}{5} \quad (9)$$

式中：hi 为胸径接近平均胸径 D 的 5 株树木的树高（m）

碳计量参数的计算

根据 IPCC（2003，2006），林木生物量的计算公式如下：

$$B=V\cdot \mathrm{BCEF}\cdot(1+\mathrm{R}) \quad (10)$$

$$B=V\cdot \mathrm{WD}\cdot \mathrm{BEF}\ (1+\mathrm{R}) \quad (11)$$

式中：B 为林木生物量 Mg（$Mg=10^6$ g）；$BCEF$ 为林木地上生物量与蓄积量的比（$Mg\cdot m^{-3}$）；V 为蓄积量（$m^3\cdot hm^{-2}$）；BEF 为林木地上生物量与树干生物量的比，无量纲；R 为林木地下生物量与地上生物量的比，无量纲；WD 为木材基本密度（$Mg\cdot m^{-3}$）

根据以上的定义，按公式(12)(13)和(14)计算 $BCEF$，BEF 和 R。

$$BECF=\frac{B_{地上}}{\mathrm{V}} \quad (12)$$

$$BEF=\frac{B_{地上}}{\mathrm{B}_{主干}} \quad (13)$$

$$R=\frac{B_{地上}}{\mathrm{B}_{地上}} \quad (14)$$

采用 Excel 和 DPS 软件计算碳计量参数，分析 $BCEF$，BEF 和 R 与林龄 A（a）、林分密度 N（株/hm^2）、平均胸径 D(cm)、平均高 H(m)、形高 FH(m) 和林分蓄积量 V($m^3\cdot hm^{-2}$) 的相关性并进行回归。

2 结果与分析

2.1 生物量转化与扩展因子（*BCEF*）

思茅松中幼人工林的 $BCEF$ 均值为 0.5483 Mg$\cdot m^{-3}$（n＝30，95％置信区间：0.5357～0.5609）。为了便于与 IPCC 的缺省值比较，根据蓄积量分组的 BCEF 均值为：蓄积量＞80 $m^3\cdot hm^{-2}$，$BCEF$＝0.5354 $Mg\cdot m^{-3}$（n＝9，95％置信区间：0.5147～0.5561）；蓄积量＝41～80 $m^3\cdot hm^{-2}$，$BCEF$＝0.5548 $Mg\cdot m^{-3}$（n＝9，95％置信区间：0.5223～0.5873）；蓄积量＝21～40 $m^3\cdot hm^{-2}$，$BCEF$＝

0.5423 Mg·m^{-3}（n=7，95%置信区间：0.5166～0.5689）；蓄积量<20 m^3·hm^{-2}，*BCEF* = 0.5677 Mg·m^{-3}（n=5，95%置信区间：0.5283～0.6070）；各组间差异不显著（*P*>0.05）。

根据相关系数（表1）判断，*BCEF* 与 *H*、*FH*、*A* 和 *V* 有显著的负相关，与 *D* 呈负相关但不显著，与 *N* 呈正相关但不显著，*BCEF* 和各林分因子中度相关（相关系数最大值为0.35691）。利用多种函数关系（二次曲线、指数函数、负指数函数、幂函数，双曲线，S曲线）回归分析后发现（表2）：*BCEF* 与 *H* 和 FH 的关系以双曲线函数形式的拟合效果稍好，与 *A* 的关系则以线性回归形式稍好。与 *V* 的关系用周广胜对落叶松林采用的模型 $y=1/(a+bx)$（赵敏和周广胜，2004）和方精云采用的模型 $y=a+b/x$（方精云等，2002）模拟的结果都不理想（R^2分别为0.1108和0.0676）。*BCEF* 与 *N* 的关系拟和也较差，总体上看各林分因子与 *BCEF* 的关系拟合效果不理想，R^2最大值仅为0.1571。

2.2 生物量扩展因子（*BEF*）

思茅松中幼人工林的 *BEF* 均值为1.78378（n=30，95%置信区间：1.71714～1.85043），根据相关系数（表3）判断，*BEF* 与 *D*、*H*、*FH*、*V* 和 *A* 有极显著的负相关关系，与 *N* 呈显著的正相关关系。利用多种的函数关系（二次曲线函数、指数函数、负指数函数、幂函数，双曲线函数，S曲线函数）的回归分析后发现（表4），*BEF* 与 *A* 和 *V* 的关系以二次曲线函数形式拟合效果相对较好，与 *N* 的关系则以双曲线形式较好，*BEF* 与 *FH*、*H* 和 *D* 的关系以幂函数较好。

表1　林分因子与 *BCEF* 的相关系数

Table 1　Correlation coefficients between stand factors and *BCEF*

林分因子 Stand factors	相关系数 Correlation coefficient	*P*
D	-0.30083	0.10623
H	-0.35691*	0.04285
FH	-0.36049*	0.04036
V	-0.33480*	0.03054
N	0.22693	0.22784
A	-0.34403*	0.04266

注：* 表示在0.05的水平上显著。

Note: Values with * mean statistically significant at 0.05 level

表2　*BCEF* 与 *H*、*FH*、*V* 和 *A* 的回归方程

Table 2 Regression equations for calculating *BCEF* with *H*、*FH*、*V* and *A* as variables

回归方程 Regression equation	*y*	*x*	a	b	R^2	*P*	*n*	*x* 范围 Range of *x*
$y=a+b/x$	*BCEF*	*H*	0.518197	0.184026	0.1555	0.0311	30	3.18-23.20
	BCEF	*Fh*	0.515434	0.111530	0.1571	0.0301	30	1.85-11.32
	BCEF	*V*	0.538235	0.356423	0.0676	0.1654	30	10.05-540.66
$y=1/(a+bx)$	*BCEF*	*V*	1.79478	0.00032	0.1108	0.0722	30	10.05-540.66
$y=a+bx$	*BCEF*	*A*	0.568011	-0.002374	0.1184	0.0627	30	3-26

表3　林分因子与 *BEF* 的相关系数

Table 3　Correlation coefficients between stand factors and *BEF*

林分因子 Stand factors	相关系数 Correlation coefficient	*P*
D	-0.94827**	<0.0001
H	-0.93772**	<0.0001
FH	-0.87769**	<0.0001
V	-0.87133**	<0.0001
N	0.44733*	0.01319
A	-0.90480**	<0.0001

注：** 表示在0.01水平上显著，* 表示在0.05水平上显著。

Note: Values with ** and * mean statistically significant at 0.01 and 0.05 level respectively

2.3 根茎比（*R*）

思茅松中幼人工林的 *R* 均值为0.2400（n=30，95%置信区间：0.2194～0.2606）。根据相关系数（表5）判断，*R* 与 *D*、*H*、*FH*、*V* 和 *A* 有极显著的负相关关系，与 *N* 呈显著的正相关关系。利用常见的函数关系（二次曲线函数、指数函数、负指数函数、幂函数，双曲线函数，S曲线函数）回归分析后发现，*R* 与 *D*、*H*、*FH*、*V* 和 *A* 的关系以二次曲线的形式拟合效果较好，与 *N* 的关系则以双曲线形式拟合相对较好（表6）。

表4 *BEF* 与 *A*、*V*、*N*、*FH*、*H* 和 *D* 的回归方程

Table 4 Regression equations for calculating *BEF* with *A*、*V*、*N*、*FH*、*H* and *D* as variables

回归方程 Regression equation	y	x	a	b	c	R^2	P	n	x 范围 Range of x
$y=a+bx+cx^2$	*BEF*	*A*	2.2222	-0.067693	0.001343	0.8979	<0.0001	30	3-26
	BEF	*V*	1.9683	-0.00276	0.000003	0.8643	<0.0001	30	10.05-540.66
$y=a+b/x$	*BEF*	*N*	2.0148	411.5837		0.4794	<0.0001	30	750-5811
$y=ax^b$	*BEF*	*FH*	2.3479	-0.212112		0.9541	<0.0001	30	1.85-11.32
	BEF	*H*	2.5748	-0.193141		0.9556	<0.0001	30	3.18-23.20
	BEF	*D*	3.1500	-0.254611		0.9664	<0.0001	30	5.38-24.66

表5 林分因子与 *R* 的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between stand factors and *R*

林分因子 Stand factors	相关系数 Correlation coefficients	*P*
D	-0.95954**	< 0.0001
H	-0.94864**	< 0.0001
FH	-0.95334**	< 0.0001
V	-0.88442**	< 0.0001
N	0.45919	0.01069
A	-0.91072**	< 0.0001

注：** 表示在 0.01 水平上显著，* 表示在 0.05 的水平上显著

Note: Values with ** and * mean statistically significant at 0.01 and 0.05 level respectively

3 讨论

3.1 思茅松人工林碳计量因子与 IPCC 缺省值比较

IPCC 是以气候带、森林类型和单位面积蓄积量给出 *BCEF* 的缺省值的，将本研究结果与相应的缺省值列于下表，可以发现本研究测算的 *BCEF* 值比 IPCC 给出的缺省值要小。当蓄积量小于 20 $m^3\cdot hm^{-2}$ 和介于 21～40 $m^3\cdot hm^{-2}$ 时，IPCC 缺省值分别为 6 和 1.2（IPCC，2006），比本研究的测定值（0.5677 和 0.5423）分别高出了 10 倍和 2 倍以上。可见当林分蓄积量小于 40 $m^3\cdot hm^{-2}$ 使用 IPCC 的 *BCEF* 缺省值对思茅松人工林进行碳汇量估算将带来很大误差。而对蓄积量为 41～80 $m^3\cdot hm^{-2}$ 和大于 80 $m^3\cdot hm^{-2}$ 的思茅松人工林，*BCEF* 值分别为 0.5548 和 0.5354，已和 IPCC 的缺省值（0.6 和 0.55）（IPCC，2006）比较接近。本研究得出的 *BCEF* 值明显低于 IPCC 缺省值可能的原因有：（1）IPCC 没有分树种和林分类型（人工林和天然林）给出 *BCEF* 值，而不同树种间、人工林和天然林间 *BCEF* 值是有差异的（罗云建等，2007）；（2）本研究对所有样地进行了每木调查。而多数森林资源调查对林木的起测胸径为 5 cm，有的甚至是 10 cm 或 20 cm，漏检了部分小径级林木，因此在使用 *BCEF* 值和蓄积量资料进行生物量估算时要根据林木蓄积量调查起测胸径，选用合适的 *BCEF* 值或对可能的误差进行说明；（3）思茅松中幼人工林 *BCEF* 值低于 IPCC 缺省值的一个重要原因是思茅松中幼人工林的木材密度较小。有研究表明 6～28 cm 径级的思茅松人工林的木材基本密度均值底部为 0.2787 $g\cdot cm^{-3}$，中部为 0.3027 $g\cdot cm^{-3}$，上部为 0.2286 $g\cdot cm^{-3}$，且思茅松木材的基本密度与年龄存在正相关关系（$R=0.556$，$P<0.05$）（李泰君等，2008）。此测定值比温室气体排放中国初始国家信息通报给出的思茅松木材密度缺省

表6 *R* 与 *N*、*D*、*H*、*FH*、*V* 和 *A* 的回归方程

Table 6 Regression equations for calculating *R* with *N*、*D*、*H*、*FH*、*V* and *A* as variables

回归方程 Regression equations	y	x	a	b	c	R^2	P	n	x 范围 Range of x
$y=a+b/x$	*R*	*N*	0.312807	-129.6466		0.4989	<0.0001	30	750-5811
$y=a+bx+cx^2$	*R*	*D*	0.426370	-0.023840	0.00046	0.9674	<0.0001	30	538-2466
	R	*H*	0.371696	-0.021868	0.000474	0.9515	<0.0001	30	3.18-2320
	R	*FH*	0.385370	-0.045023	0.001891	0.9519	<0.0001	30	1.85-11.32
	R	*V*	0.296645	-0.00084	0.000001	0.8781	<0.0001	30	10.05-540.66
	R	*A*	0.371718	-0.020073	0.00038	0.8959	<0.0001	30	3-26

表7　IPCC 的 BCEF 缺省值与思茅松人工林测定值比较

Table 7　Determined *BCEF* for *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation against IPCC default value

类型 Forest type	蓄积量 ($m^3 \cdot hm^{-2}$) Growing stock	IPCC 缺省值 IPCC default value	思茅松人工林测定值 Determined value
亚热带针叶林	＜20	6	0.5677
Sub-tropical	21～40	1.2	0.5423
coniferous forests	41～80	0.6	0.5548
	＞80	0.55	0.5354

值（0.454）（国家林业局应对气候变化和节能减排工作领导小组办公室，2008）要低很多。

思茅松中幼人工林的 *BEF* 均值（1.78378）比 IPCC 缺省值（1.3）和国家缺省值（1.58）都要高。可能是因为思茅松人工林在生长的前期，由于密度控制和林分抚育，林木对光照竞争不如天然林强烈，树冠和根系都比天然林能得到更充分的生长，所以 *BEF* 值大于综合了多树种和不同林分起源类型（人工林和天然林）的 IPCC 缺省值和国家缺省值。根据 IPCC 对 *BECF* 和 *BEF* 的定义，两者的关系为：*BCEF* ＝ *BEF*• WD（WD 为木材基本密度）。按本研究独立测算的 *BCEF*（0.5483 $Mg \cdot m^{-3}$）与 *BEF*（1.78378）均值推算的思茅松木材基本密度 WD（0.3074 $g \cdot cm^{-3}$）与李泰君等（2008）测定的中幼龄思茅松人工林样木中部的木材基本密度均值（0.3027 $g \cdot cm^{-3}$）高度吻合，这从一个侧面证实了本研究的准确性。

思茅松中幼人工林的 *R* 均值为 0.24，与 IPCC 给出的亚热带湿润森林缺省值（地上生物量＞125 $t \cdot hm^{-2}$ 时，$R = 0.24$；＜125 $t \cdot hm^{-2}$ 时，$R = 0.22$）基本一致，与罗云建等（2007）计算的落叶松人工林 *R* 值（0.2511）相差不大，说明与其它两个碳计量参数相比，*R* 受树种和林分类型等因素的影响较小。

3.2　思茅松人工林碳计量参数的使用

本研究测算的思茅松人工林 *BCEF* 和 *BEF* 与 IPCC 的对应缺省值之间存在一定差异，在进行思茅松人工林生物量碳计量时宜采用本研究得出的碳计量参数。思茅松人工林的 *BEF* 和 *R* 与林分因子（*H*、*FH*、*A*、*V* 和 *N*）存在明显的函数关系，为了更进一步降低人工林生物量碳计量结果的不确定性，可以使用研究建立的 *BEF* 和 *R* 与林分因子的回归模型计算 *BEF* 和 *R*，但自变量不宜超过建立模型的范围。*BCEF* 与林分因子（如 *H*、*D*、*FH*、*A*、*V* 和 *N*）间的回归拟合效果不好，对 *BCEF* 与相关林分因子的数量关系尚需要进一步研究。也可采用公式 *BCEF* ＝ *BEF*•*WD* 通过木材基本密度 *WD* 将 *BEF* 转换为 *BCEF*，但必须保证木材密度 *WD* 和需要转换的 *BEF* 和 *BCEF* 源自同一抽样林分，否则会带来较大误差（IPCC，2006）。此外，因云南营建思茅松人工林的历史较短，本文调查样地中林龄最大的人工林仅为 26 年，对碳计量参数随年龄和其它林分因子变化的相关关系还需要进一步跟踪研究。

致谢　云南省林业科学院景跃波副研究员为本文提出有益的修改意见；西南林学院 2006 级研究生刘海刚参加大量野外调查工作。

〔参　考　文　献〕

云南省林业厅，2004. 云南省森林资源规划设计调查操作细则（试行）［S］. 52—53，58

云南省森林资源连续清查办公室，2007. 国家森林资源连续清查云南省第五次复查操作细则［S］. 1，66，72

吴中伦，1999. 中国森林（第 2 卷：针叶林）［M］. 北京：中国林业出版社，983

国家林业局应对气候变化和节能减排工作领导小组办公室，2008. 中国绿色碳基金造林项目碳汇计量与监测指南［M］. 北京：中国林业出版社，44，63

徐永椿，毛品一，伍聚奎等，1998. 云南树木图志（上）［M］. 昆明：云南科技出社，90

Brown S，Sathaye J，Canell M *et al*.，1996. Mitigation of carbon emission to the atmosphere by forest management［J］. *Commonwealth Forestry Review*，**75**：80—91

Fang JY（方精云），Chen AP（陈安平），Zhao SQ（赵淑清）*et al*.，2002. Estimating biomass carbon of China′s forests：supplementary notes on report published in SCIENCE（291：2320—2322）by Fang *et al*.（2001）［J］. *Acta Phytoecologica Sinica*（植物生态学报），**26**（2）：243—249

IPCC，2003. Good practice guidance for land use，land use change and forestry.［EB/OL］.［2004-05-01］. http：//www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html

IPCC，2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory.［EB/OL］.［2009-05-15］. http：//www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html

Li TJ（李泰君），Xu H（胥辉），Ding Y（丁永） *et al*.，2008. Study on biomass model and bark rate and basic density of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* [J]. *Forestry Science and Technology*（林业科技），**33**（4）：20—23

Liu GH（刘国华），Ma KM（马克明），Fu BJ（傅伯杰） *et al*.，2003. Aboveground biomass of main shrubs in dry valley of Minjiang River [J]. *Acta Ecologica Sinica*（生态学报），**23**（9）：1757—1764

Luo YJ（罗云建），Zhang XQ（张小全），Hou ZH 侯振宏） *et al*.，2007. Biomass carbon accounting factors of *Larix* forests in China based on literature data [J]. *Journal of Plant Ecology*（植物生态学报），**31**（6）：1111—1118

Sabine CL，Heimann M，Artaxo P *et al*.，2004. Current status and past trends of the global carbon cycle [A]. In：Field C，Raupach M eds. The Global Carbon Cycle：Integrating Humans，Climate and the Natural Work [M]. Washington：Island Press，17—44

Wu ZL（吴兆录），Dang CL（党承林），1992. Biomass and net productivity of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* forest in Changning County，Yunnan [J]. *Journal of Yunnan University*（Natural Sciences Edition）（云南大学学报 自然科学版），**14**（2）：137—145

Zeng LX（曾立雄），Wang PC（王鹏程），Xiao WF（肖文发） *et al*.，2008. Allocation of biomass and productivity of main vegetations in three gorges reservoir region [J]. *Scientia Silvae Sinicae*（林业科学），**44**（8）：16—22

Zhang XQ（张小全），Zhu JH（朱建华），Hou ZH（侯振宏），2009. Carbon removals/sources of forests and forest conversion and applied carbon accounting methods and parameters in major developed countries [J]. *Forest Research*（林业科学研究），**22**（2）：285—293

Zhao M（赵敏），Zhou GS（周广胜），2004. Forest inventory data（FID）based biomass models and their prospects [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*（应用生态学报），**15**（8）：1468—1472